



**PETO  
JUGOSLAVENSKO  
SAVJETOVANJE  
O ROBOTIZACIJI**

**JUROB '89**

**ZBORNIK RADOVA**

**Rijeka, 19 - 21.04.1989.**

45	I. MANDIĆ, M. VUKMIRICA - Viševereličinsko invarijantno vođenje manipulatora	4 - 146
	R. MURN, D. PEČEK - Merjenje dimenzij z elementi računalniškega vida	4 - 151
52	B. NEMEC, I. SAJE, V. ILC, J. LENARČIČ, L. TRDAN - Menijsko orjentiran programski sistem za učenje in vođenje robota RIKO-106	4 - 156
57	F. SOLINA - Uporaba umetnega vida v robotiki - pregled metod	4 - 161
63	S. STOJKOVIĆ - Razvoj i proizvodnja industrijskih robota univerzalne aplikacije	4 - 166
68	B. ŠUŠTERIČ, F. GOLENKO, T. SLIVNIK - Rezultati algoritma za načrtovanje poti mobilnih robotov	4 - 171
73	S. URAN, R. ŠAFARIČ, I. ŠTERN, M. TERBUC, K. JEZERNIK - Robotska celica magnet	4 - 176
78	L. VUGA - Kritičnost ekonomskih kriterijev pri odločanju o investicijah v visoko tehnologijo	4 - 181
85	I. ČOSIĆ, R. MAKSIMOVIĆ, D. ŠEŠLIJA - Prilog istraživanju radnih karakteristika robotizovanih montažnih sistema	4 - 187
95	Z. JEGEŠ, Đ. MEŠTER - Kontralabilnost elastičnog mehaničkog reduktora robota u prisustvu ekscentričnosti	4 - 195
100	D. NOE, J. JELENC, J. KRANJC - Modularno grajene fleksibilne strežne naprave	4 - 202
105	A. BENCSIK - Technische Hochschule für Maschinenbau Bánki Donát	4 - 209
110	I. RUDAS - Fault Diagnosis in Industrial Robots	4 - 223
	<b>5. POSTER PRIKAZI STUDENTSKIH RADOVA</b>	
118	GORAN AŠONJA - Program za simulaciju kretanja osnovne konfiguracije robota "SCARA"	5 - 1
123	ALEKSANDER BASTL, MATEJ PARADIŽ - Določanje prve poti za načrtovanje optimalnih poti mobilnih robotov	5 - 6
128	ROBERT CEGLAR - Simulacija sledilnega mobilnega robota	5 - 9
141	ANDREJA KOŠUTNIK - Računalniško krmiljenje modela transportnega sistema	5 - 13

Franc Solina

## Uporaba umetnega vida v robotiki — pregled metod

### Computer vision applications in robotics — an overview

**POVZETEK** — Namen tega preglednega članka je seznanjanje bralca z osnovnimi pristopi v umetnem vidu na področju robotike, od postopkov za prepoznavanje in lociranje znanih predmetov, do navigacije in umikanja oviram mobilnih robotov s pomočjo vida. Članek je zaokrožen z obravnavo nekaterih odprtih aktualnih problemov v robotskem vidu: integracijo informacije iz večih istovrstnih ali različnih senzorjev, aktivno percepcijo in segmentacijo slik.

**ABSTRACT** — An overview of current computer vision methods for applications in robotics is given. Covered are issues in model based object recognition, visual navigation and object avoidance for mobile robots. Some open problems such as sensory integration, active vision and segmentation are explained.

## 1 Uvod

Vid omogoča inteligentno interakcijo z okolico brez fizičnega kontakta. Z vidom lahko ugotovimo položaj predmetov, jih prepoznamo in določimo relacije med njimi. Čeprav še zdaleč ne razumemo vseh podrobnosti mehanizma človeškega vida, pa poskušamo tudi strojem dati možnost vizualne percepcije iz istih razlogov kot jo posedujemo ljudje, da bi namreč lahko stroji vzajemno delovali s spreminjajočim se okoljem. S preučevanjem vida pa se ne ukvarja samo računalniški vid temveč cela vrsta disciplin, vsaka s specifičnega zornega kota. Psihofizika, ki je poddisciplina psihologije, preučuje mehanizme človeškega zaznavanja na nivoju čutil z natančnimi meritvami strogo kontroliranih eksperimentov. Kognitivno znanost pa bolj zanimajo višji procesi človeškega zaznavanja, to je interpretacije vizualne informacije, ki se oddigra v možganih. Te procese je še nemogoče ali pa izjemno težko direktno meriti oziroma preveriti postavljene hipoteze, čeprav si je to za cilj postavila kognitivna neurofiziologija, novo meddisciplinarno področje med psihologijo, nevrofiziologijo in računalništvom.

Čeprav so si cilji in metode naštetih raziskovalnih disciplin, ki se ukvarjajo z vidom različni, pa se je vseeno izoblikovalo enotno gledanje na celoten problem vida, namreč, da je vid je potrebno preučevati vsaj na treh nivojih [10]. Najvišji ali najbolj splošen nivo je problem izračunljivosti, to je kakšne so sploh informacije, ki so potrebne za vizualno percepcijo. Na drugem nivoju je potem preučevanje različnih možnih algoritmov na katerih vid sloni. Stvar tretjega, najnižjega nivoja, pa so konkretne implementacije algoritmov, to je vse od bioloških sistemov pa do digitalnih ali optičnih naprav. V smislu te delitve se je dobršen del raziskovalcev računalniškega vida usmeril na študij posameznih ozko zastavljenih problemov,



kot so na primer rekonstrukcija globine iz senčenja, gibanja ali parov stereo slik. Poleg tega, da hitrost ni bila v prvem planu, večina teh algoritmov potrebuje dodatne omejitve, ki pa jih na splošno ni moč zagotoviti. Pri projekciji tridimenzionalnih oblik na dvodimenzionalno slikovno ploskev se namreč izgubi informacija, tako da inverzna transformacija ni enoznačna. Opisano smer raziskovanja v računalniškem vidu lahko imenujemo rekonstruktivna šola, saj si prizadeva rekonstruirati obliko, globino ali gibanje iz posameznih vizualnih virov informacij kot so senčenje, obris, tekstura ali stereo. Išče rešitve splošnih problemov s pomočjo specifičnih omejitev. Druga šola pa je usmerjena k reševanju konkretnih problemov. Išče rešitve specifičnih problemov brez specifičnih omejitev. Te konkretne probleme definira predvsem *uporaba* vida v industriji in robotiki na sploh. Ta del računalniškega vida zato lahko imenujemo tudi robotski vid. Splošen pregled računalniškega oziroma robotskega vida je podan v [4] in [12]. Preostali del članka je namenjen podrobnejši predstavitvi uporabe umetnega vida v robotiki.

## 2 Robotski vid

Robotski vid imenujemo tisti del računalniškega vida, ki je orientiran k čisto določenim aplikacijam, ponavadi v povezavi z roboti ali pa tudi s klasičnimi avtomatiziranimi proizvodnimi linijami. To so predvsem problemi razpoznavanje, določanje položaja in orientacije predmetov, sledenje gibajočim ciljem in vizualna navigacija. Zaradi praktične narave aplikacij je ena od glavnih skrbi zadostna hitrost, kar omejuje izbiro možnih algoritmov, vsaj za obstoječo računalniško tehnologijo. Ker je rekonstrukcija globine iz enookih značnic (oris, tekstura, senčenje, barvni zamik) ali tudi iz parov stereo slik težavna in zamudna, se v aplikacijah pogosto zatekamo k direktnemu merjenju globine [5]. Ena možnost je z laserjem prečesati celotno področje slike in za vsak slikovni element izmeriti čas odboja svetlobe. Splošno uporabnost te aktivne uporabe laserjev krni škodljivost laserske svetlobe, ki mora imeti za ta namen precej visoko energijo. Druga možnost je uporabiti triangulacijo, tako da osvetlimo del scene s tankim snopom svetlobe (pogosto se spet uporablja laser, čeprav ni nujno, da je svetloba strukturirana, moč laserja pa je lahko veliko manjša) in nato iz znane usmeritve svetlobnega vira in položaja kamere izračunamo oddaljenost osvetljenega dela scene. Ko s svetlobnim snopom prečesamo celotno sceno sestavimo ustrezajočo globinsko sliko.

Zaradi preglednosti bomo v nadaljevanju metode robotskega vida razdelili na dve skupini. Podpoglavje 2.1 je posvečeno statičnim sistemom, podpoglavje 2.2 pa govori o vidu za mobilne robote.

### 2.1 Statični sistemi za vid

V statičnih sistemih za vid se razen scene oziroma predmetov v delovnem prostoru nič ne spreminja. Še posebej se ne spreminja geometrijske konfiguracije sistema, saj je po vsaki taki spremembi potrebno na novo kalibrirati sistem, kar pomeni poiskati geometrijsko transformacijo med koordinatnim sistemom slike in nekim bazičnim koordinatnim sistemom. Taki sistemi so v praksi najbolj razširjeni, saj so najbolj enostavni. Namenjeni so za popravke pri določanju položaja, kot so na primer potrebni pri vstavljanju integriranih vezij v plošče s tiskanimi vezji, za pobiranje posameznih predmetov s tekočega traku ali celo za pobiranje predmetov iz zabojnikov, kjer so predmeti nametani brez vsakega reda [7]. V teh primerih mora sistem določiti položaj in orientacijo predmeta na katerega se je sistem osredotočil, ter

način prijemanja z robotsko roko, če je potrebna manipulacija. Razširjeni so tudi sistemi za inšpekcijo, kjer je možno vizualno identificirati pomanjkljivosti.

Večina sistemov sloni na tako imenovani metodi *razpoznavanje predmetov na osnovi modelov*, ki je najbolj razširjena metoda umetnega vida v industrijskih aplikacijah [6]. To metodo bi lahko opisali kot neko vrsto ugibanja kateri predmet je na sliki na osnovi posameznih značilnih potez (features), kar nato preverimo s projiciranjem ustreznega modela na sliko. Število in vrsta možnih predmetov v slikah pri industrijskih aplikacijah je namreč majhno in natančne modele teh predmetov lahko izdelamo že vnaprej. Tako tudi že vnaprej vemo kateri modeli in v kakšnem položaju in orientaciji lahko povzročijo značilne poteze v sliki. Posamezna poteza v sliki pa seveda lahko postavi veliko možnih hipotetičnih modelov, ki jih verifiramo s projiciranjem modelov na sliko. Če se projekcija modela sklada tudi z ostalimi potezami v sliki tak model sprejmemo kot pravilno interpretacijo. Ker število hipotetičnih modelov kombinatorično narašča s številom različnih modelov v podatkovni zbirki in s številom različnih potez, se izplača obrezati kombinatorično drevo vseh možnih hipotez. To storimo z izločanjem nekonsistentnih hipotez, ki se izkažejo z nemogočo kombinacijo dveh ali večih lokalnih potez.

## 2.2 Vid za mobilne robote

Kot prehodno obliko med statičnimi sistemi za vid in sistemi za mobilne robote uvrstimo sicer statične sisteme, pri katerih pa se takorekoč vsi sistemski parametri lahko spreminjajo. S povratnimi zankami, v odvisnosti od potreb procesiranja, lahko spreminjamo zaslonko, ostrenje, goriščno razdaljo, če so objektivni z nastavljivo goriščno razdaljo, nadalje kot med parom stereo kamer, kakor tudi položaj in usmeritev kamer [3]. Tako mobilnost najlažje dosežemo z namestitvijo kamer na konec robotske roke. Kalibracija takih mobilnih kamer je veliko bolj zapleteno od statično nameščenih in se še preučuje. Taki sistemi se dosedaj uporabljajo največ za nadzor in sledenje gibajočim objektom. Kamere naprimer lahko sledijo gibanju ali zožijo zorni kot za podrobnejše preiskovanje dela scene.

Najbolj zanimivi pa so sistemi ki so nameščeni na mobilnih robotih in so namenjeni navigaciji s pomočjo vida [9]. Tu imamo v mislih predvsem mobilne robote na kolesih, čeprav se v robotiki posvečajo tudi robotom, ki lahko hodijo, oziroma skačejo. Pri slednjih robotih je stabilnost gibanja tisti osrednji raziskovalni problem, zato se še ne uporabljajo v integraciji z vidom. V raziskovalne namene je bilo konstruiranih že veliko manjših avtonomnih robotov, ki se lahko gibljejo naprimer v notranjosti laboratorija ali zgradbe. Mobilni roboti imajo ponavadi vgrajene poleg senzorjev vida tudi senzorje za zaznavanje bližine (ultrazvok) in pa merilce razdalje v kolesih. Strežni vozički za prevažanje materiala in polizdelkov med robotskimi celicami v avtomatizirani tovarni je ena od možnih aplikacij takih sistemov. Kar olajšuje problem je spet to, da lahko že vnaprej sprogramiramo tloris delovnih prostorov. Med gibanjem mobilnega robota zanesljivost poznavanja točnega položaja robota v prostoru stalno slabi, toda vsakokrat ko robot pristane v naprej določeni poziciji, ta nezanesljivost pade zopet na nič. Mobilni robotski sistem z najbolj ambiciozno zastavljenimi cilji pa je ameriški projekt avtonomnega zemeljskega vozila ALV (Autonomous Land Vehicle) katerega cilj je, da bi vozilo brez voznika lahko sledilo cesti in celo doseglo določen cilj z vožnjo po brezpotju, kjer bi se moralo uspešno izogibati oviram. Tu zopet lahko služijo natančni digitalni višinski zemljevidi, toda bolj realno je pričakovati le to, da bo mobilni robot imel na voljo dosti manj natančen zemljevid le z redko posejanimi orientirnimi točkami. Naravno okolje je tudi veliko bolj spremenljivo in nepredvidljivo kot je notranjost laboratorija ali



tovarne. Spreminja se osvetljenost, motijo ostre sence, z letnimi časi pa se izredno spremenijo barve in vegetacija.

### 3 Zaključek

Čeprav se je umetni vid že potrdil s številnimi uspešnimi aplikacijami, je odprtih še veliko temeljnih problemov. Če se ozremo najprej na statične sisteme umetnega vida, lahko ocenimo kot njihovo glavno pomanjkljivost omejeno število predmetov, ki jih je sistem zmožen spoznati, kajti za vsak predmet mora imeti natančen geometrijski model njegove oblike. To pa ni možno zagotoviti v vsakem okolju. Razvrščanje poštnih pošilk s pomočjo umetnega vida naprimer ni možno zasnovati na točnih geometrijskih modelih, temveč največ na nekih splošnih skupinskih lastnostih, saj dejanske izmere in oblike nastopajo v izredno velikem razponu [14]. To je pravzaprav problem kategorizacije, kajti tudi ljudje razpoznavamo predmete, ki jih dotedaj še nikoli nismo videli s tem, da jih uvrstimo v neko kategorijo — skupino predmetov s skupnimi lastnostmi [2]. Obstoječe metode, ki se že uporabljajo v praksi, je zato nemogoče razširiti tako, da bi bili sposobni reševati bolj splošne probleme. Če za razpoznavanje natančnih geometrijskih modelov oblik predmetov ni možno imeti, mora sistem iz lokalnih geometrijskih modelov, ki predstavljajo posamezne poteze (robove, zaključene površine) sestaviti modele, ki predstavljajo sceno na ravni celih predmetov ali vsaj njihovih delov [8]. Postavlja se vprašanje, katere so tiste geometrijske primitivne oblike, ki lahko opisujejo poljubne naravne oblike? Vsak korak k bolj kompaktnemu opisu slike oziroma predmetov v sliki pa ovira šum, napačni ali manjkajoči lokalni modeli. Če je naprimer na sliki kocka, je naivno pričakovati, da bomo za vse njene robove dobili po en model daljice, ki bi jih lahko enostavno združili v žični model kocke. Zato se tudi metode sledenja robov za rekonstrukcijo tridimenzionalnih oblik v praksi niso obnesle. Napredovati bo moralo naše razumevanje segmentacije, potrebujemo pa tudi nove geometrijske modele za opisovanje oblik.

Le redko lahko predpostavimo, da je v določeni sceni, ki jo sistem za umetni vid mora analizirati, prisoten le eden predmet. Če je v sceni več predmetov, mora sistem za vid sceno najprej razdeliti na regije ali segmente, ki ustrezajo posameznim predmetom. To operacijo zato imenujemo *segmentacija*. Čeprav se problema segmentacije in predstavitve oblike ponavadi obravnavata ločeno, pa sta neločljivo povezana. Izredno težko je rešiti kateregakoli od njiju povsem neodvisno od drugega. Če je slika pravilno razdeljena na segmente, ki ustrezajo posameznim predmetom, je rekonstrukcija oblike veliko lažja kot pa če teh razmejitev ni. Na drugi strani pa je segmentacija lažja, če vemo kakšno obliko imajo predmeti, ki so prisotni v sliki. Ena od obetavnih metod za segmentacijo in predstavitev oblike je uporaba parametričnih geometrijskih volumetričnih modelov, ki se lahko prilagajajo številnim naravnim oblikam, notranja parametrizacija pa je robni pogoj oziroma vir dodatne informacije, ki omogoča invertirati večznačno slikovno transformacijo [13,15].

Dodatne informacije pa se skrivajo tudi v samem aktu gledanja, saj gledanje pri človeku ni pasiven proces, temveč se oči stalno prilagajajo okoliščinam in nalogam, tako da raziskujejo in aktivno iščejo dodatne informacije. Problemi ki niso stabilni za pasivnega opazovalca postanejo rešljivi za aktivnega opazovalca. Posamezni moduli, naprimer za rekonstrukcijo globine, pa postanejo mnogo bolj zanesljivi, če lahko med seboj sodelujejo in se podpirajo. Ta nova raziskovalna smer v računalniškem vidu se imenuje *aktivni vid* [3]. Uporaba večih virov informacij, bodisi iz večih senzorjev ali zaporedja večih slik pa odpre nove težave. Informacije iz različnih virov si pogosto nasprotujejo, toda združiti jih moramo v najbolj

verjetno oziroma konsistentno sliko sveta. To takoimenovano integracijo in kontrolo senzorjev se je možno lotiti s statističnimi metodami in teorijo odločitev [11]. Integrirati pa ni moč le informacije iz istovrsnih senzorjev, temveč tudi različne vrste zaznavanja, kot sta na primer vid in otip, ki v robotiki igra vedno večjo vlogo [1].

## Literatura

- [1] P. K. Allen, *Robotic object recognition using vision and touch*. Boston: Kluwer, 1987
- [2] R. Bajcsy in F. Solina, "Three dimensional shape representation revisited," *Proceedings First International Computer Vision Conference*, pp. 231-240, London, England, 1987
- [3] R. Bajcsy, "Active perception," *Proceedings of the IEEE*, vol. 76, no. 8, pp. 996-1005, 1988
- [4] D. H. Ballard in C. M. Brown, *Computer vision*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1982
- [5] P. J. Besl in R. C. Jain, "Range image understanding", *IEEE Proceedings on Computer Vision and Pattern Recognition*, pp. 430-449, San Francisco, 1985
- [6] P. J. Besl in R. C. Jain, "Three dimensional object recognition", *ACM Computing Surveys*, vol. 17, no. 1, pp. 75-145, 1985
- [7] R. C. Bolles in P. Horaud, "3DPO: A three-dimensional part orientation system." *International Journal of Robotics Research*, vol. 5, no. 3, pp. 3-26, 1986
- [8] R. A. Brooks, "Model-based 3-D interpretations of 2-D images", *IEEE Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. PAMI-5, no. 2, pp. 140-150, 1983
- [9] R. A. Brooks, "Autonomous mobile robots", v W. E. L. Grimson in R. S. Patil (Urednika): *AI in the 1980s and beyond*, Cambridge, MA: MIT Press, 1987
- [10] D. Marr, *Vision*. San Francisco: Freeman, 1982
- [11] G. Hager, "Searching for information", *Proceedings of Workshop on Spatial Reasoning and Multi-Sensor Fusion*, pp. 313-322, St. Charles, IL, 1987
- [12] B. K. P. Horn, *Robot vision*, Cambridge, MA: MIT Press, 1986
- [13] A. P. Pentland, "Perceptual organization and the representation of natural form." *Artificial Intelligence*, vol. 28, no. 3, pp. 293-331, 1986
- [14] F. Solina in R. Bajcsy, "Range image interpretation of mail pieces with superquadrics," *Proceedings AAAI-87*, pp. 733-737, Seattle, WA, 1987
- [15] F. Solina, "Shape recovery and segmentation with deformable part models." Ph.D. dissertation, University of Pennsylvania, Philadelphia, 1987.

### Avtorjev naslov je:

Docent dr. Franc Solina, dipl. ing.  
 Katedra za računalništvo in informatiko  
 Fakulteta za elektrotehniko in računalništvo  
 Univerza v Ljubljani  
 Tržaška 25  
 61001 Ljubljana